

необходимого для обеспечения условия совместности поперечных деформаций стальной оболочки и бетонного ядра.

Для этого принимаем $\sigma_{CE,0} = 0$ и затем задаемся приращением начального самоупругения

$$\sigma_{CE,j} = \sigma_{CE,j-1} + \Delta\sigma_{CE} \quad (j \in [1; k]). \quad (17)$$

Выполняя вышеизложенный расчет по определению самоупругения в предельной стадии $\sigma_{CE,j,u}$ для j -го значения начального самоупругения $\sigma_{CE,j}$, определяем минимальное значение начального самоупругения $\sigma_{CE,0,min}$, руководствуясь следующим условием:

$$\sigma_{CE,0,min} = \sigma_{CE,k}, \quad (18)$$

при

$$\sigma_{CE,k,u} = \sigma_{CE,k,n} = 0, \quad (19)$$

или для практических расчетов при

$$\frac{\sigma_{CE,k,u}}{\sigma_{CE,k}} = \frac{\sigma_{CE,k,n}}{\sigma_{CE,k}} \leq \varepsilon. \quad (20)$$

Заключение. Разработанный алгоритм позволяет определить величину бокового давления, полученную за счет предварительного напряжения, на границе двух материалов сталетрубобетонных элементов в предельной стадии, необходимую для расчета прочности таких элементов, а также минимальное значение начального самоупругения необходимого для обеспечения совместности поперечных деформаций стальной оболочки и бетонного ядра в зависимости от механических и геометрических характеристик материалов.

Представленные положения по расчету значения предварительного напряжения в предельной стадии и величины минимально необходимого преднапряжения для обеспечения совместности поперечных деформаций композитного сечения справедливы при любом способе создания начальных предварительных напряжений в сталетрубобетонных элементах.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лукша, Л.К. Прочность трубобетона / Л.К. Лукша. – Минск: Высшая школа, 1977. – 96 с.

2. Мартиросов, Г.М. Трубобетонные элементы из бетона на напрягающем цементе / Г.М. Мартиросов, А.И. Шахворостов // Бетон и железобетон. – 2001. – № 4. – С. 12–13.
3. Кришан, А.Л. Сталетрубобетонные колонны с предварительно обжатым ядром / А.Л. Кришан, М.Ш. Гареев, А.И. Сагадатов // Бетон и железобетон. – 2004. – № 6. – С. 9–13.
4. Сахаров, А.А. Несущая способность трубобетонных элементов с бетоном, твердеющим под давлением : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / А.А. Сахаров; Самар. гос. арх.-строй. акад. – Самара, 1999. – 23 с.
5. Фонов, В.М. Прочность и деформативность трубобетонных элементов при осевом сжатии / В.М. Фонов, И.Г. Людковский, А.П. Нестерович // Бетон и железобетон. – 1989. – № 1. – С. 4–6.
6. Гареев, М.Ш. Прочность сжатых сталетрубобетонных элементов с предварительно обжатым ядром : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / М.Ш. Гареев. – Магнитогорск, 2004. – 161 с.
7. Сагадатов, А.И. Напряженно-деформированное состояние сжатых трубобетонных элементов с внутренним стальным сердечником : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / А.И. Сагадатов; Магнитогор. гос. техн. ун-т. им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2006. – 22 с.
8. Кузнецов, К.С. Прочность трубобетонных колонн с предварительно обжатым ядром из высокопрочного бетона : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / К.С. Кузнецов; Магнитогор. гос. техн. ун-т. им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2007. – 19 с.
9. Бондаренко, В.М. Исследование и разработка общей методики расчета трубобетонных элементов с ядром из бетона на напрягающем цементе / В.М. Бондаренко // Проблемы безопасности на транспорте : материалы междунар. науч.-практ. конф.; под общ. ред. В.И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2007. – С. 242-244.
10. Бондаренко, В.М. Расчет прочности сталетрубобетонных элементов с ядром из бетона на напрягающем цементе при центральном сжатии / В.М. Бондаренко, Л.К. Лукша // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : сб. тр. XV междунар. науч.-метод. семинара : в 2-х т. / под общ. ред. Д.Н. Лазовского, А.А. Хотько. Новополоцк, ПГУ, 27-28 ноября 2008 г. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – Т.1. – С. 206-214.

Материал поступил в редакцию 10.03.09

BONDARENKO V.M. Accounting of prestressing for concrete filled steel tubes strength calculation

It is analysed the stress-strain condition prestressed concrete filled steel tubes of round cross-section at action of longitudinal compressing forces. Algorithms of definition of size of a self-pressure in a strength limit stage, and also - calculation minimally necessary for condition of compatibility of cross-section strains of initial value of a self-pressure are offered.

УДК 624.012.46

Бондаренко В.М., Павлова И.П.

ПРИМЕНЕНИЕ БЕТОНОВ НА НАПРЯГАЮЩЕМ ЦЕМЕНТЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СТАЛЕТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Введение. Одним из способов обеспечения совместной работы стальной оболочки и бетонного ядра сталетрубобетонных элементов в поперечном направлении при действии продольных сжимающих усилий является применение бетонов на напрягающем цементе. Такие бетоны изготавливают на основе портландцемента и расширяющихся добавок. Среди разнообразия применяемых добавок особый интерес представляют алюминатно-сульфатные и алюмооксидные добавки, а также их комбинации, свойства которых определяются условиями гидратации и твердения алюминатов и сульфалюминатов кальция, а также их соединений с силикатами и сульфатами.

Изучением условий образования гидрата сульфалюмината

кальция, его модификаций, порядка их превращений и устойчивостью структуры занимаются многие исследователи [1-3]. Однако единого взгляда относительно свойств гидратов сульфалюмината кальция не установлено. Наоборот, во многих случаях высказывают прямо противоположные мнения.

По выдвинутой профессором В.В. Михайловым теории расширения цементного камня [4, 5] образование гидрата сульфалюмината кальция и появление свободных и связанных деформаций объясняется тем, что при гидратации исходных минералов и химических соединений в среде, насыщенной гидроокисью кальция, сначала образуется низкосульфатная форма гидрата сульфалюмината

Павлова Инесса Павловна, к.т.н., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов Учреждения образования «Брестский государственный технический университет».

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

кальция $C_3A(CS)H_{12}$ или ее аналоги, которые затем в водной среде перекристаллизуются в высокосульфатную форму $C_3A(CS)_3H_{32}$.

В среде, насыщенной гидроокисью алюминия, быстро образуется высокосульфатная форма гидрата сульфалюмината кальция, аналогично тому, как в среде гидроокиси кальция быстро возникает низкосульфатная форма гидрата сульфалюмината кальция.

Перекристаллизация, по мнению В.В. Михайлова, может быть замедлена или даже временно прекращена уменьшением количества воды затворения и перенасыщением среды $Ca(OH)_2$. Чем больше в составе твердеющего композита образуется низкосульфатной формы гидрата сульфалюмината кальция, готового к перекристаллизации, тем энергичнее в определенных условиях пройдет его перекристаллизация и существенно выше будет степень самоупругения.

С точки зрения применения напрягающего цемента и бетонов на его основе, трубобетонные элементы обладают следующими особенностями:

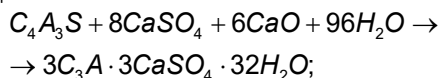
- в процессе твердения бетона на напрягающем цементе практически невыполнимо его внешнее увлажнение, а следовательно рост собственных деформаций происходит в условиях изоляции без доступа дополнительной свободной воды при гидратации, необходимой для перекристаллизации моносульфата в этрингит;
- процессу расширения напрягающего бетона препятствует внешняя стальная оболочка элемента, в результате чего твердеющее бетонное ядро находится в трехосном напряженном состоянии сжатия.

Таким образом, состав напрягающего цемента и бетона на его основе, используемого при изготовлении самоупругенных сталетрубобетонных элементов, должен обеспечивать большую энергию расширения (самоупругения) в условиях трехосного ограничения без дополнительного увлажнения в процессе твердения.

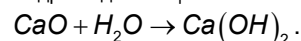
1. Применение комплексной расширяющейся добавки для изготовления напрягающего цемента. Как было отмечено выше, применение традиционных напрягающих цементов (типа М) [6] в сталетрубобетонных элементах оказывается неэффективным в связи с изолированными условиями твердения в условиях объемного ограничения, т.к. для реализации полного механизма расширения данного вяжущего через образование этрингита обязательным условием является дополнительный доступ свободной воды в процессе гидратации.

Для решения означенной проблемы было предложено использовать четырехкомпонентный состав, отличающийся от классического (типа М) введением в систему четвертой составляющей – добавки РСАМ [7], позволяющий осуществлять расширение по двум механизмам:

1) образование высокосульфатной формы гидросульфалюмината кальция



2) образование гидроксида кальция



Применение добавок такого типа позволит получать необходимую величину самоупругения бетона в изолированном состоянии без дополнительного увлажнения, варьируя как количественный состав напрягающего цемента, так и его расход.

2. Экспериментальные исследования самоупругения бетонов на напрягающем цементе с комплексной расширяющейся добавкой. Для экспериментальной проверки выдвинутых выше предположений был изготовлен напрягающий цемент, представляющий собой смесь портландцемента марки М500 Д0 с комплексной расширяющейся добавкой. В качестве расширяющейся добавки использовалась смесь глиноземистого цемента марки ГЦ-40, двухводного гипса и расширяющегося сульфалюминатного модификатора (РСАМ). Химический состав компонентов напрягающего цемента приведен в таблице 1. Массовые соотношения компонентов напрягающих цементов, использованных в экспериментальных исследованиях, приведены в таблице 2.

Для приготовления бетонной смеси в качестве мелкого заполнителя использовался песок с модулем крупности $M_k = 2,32$, а в качестве крупного заполнителя – гранитный щебень фракции 5..20 мм.

Расход цемента назначался таким образом, чтобы получить бетоны с разными показателями расширения. Составы бетонных смесей, рассчитанные в соответствии с рекомендациями [8], приведены в таблице 3.

Высокое содержание алюминатной составляющей в композитном вяжущем приводит к потере:

- удобоукладываемости бетонной смеси;
- сокращению сроков схватывания.

Технология изготовления трубобетонных элементов [9] требует применения высокоподвижных смесей. Поэтому, одним из основных требований при использовании напрягающего бетона в трубобетонных конструкциях является применение высокоэффективных пластификаторов. Кроме того, трубобетонные элементы преимущественно изготавливаются непосредственно на строительной площадке, а значит, к бетонным смесям также предъявляются жесткие требования по срокам схватывания и сохранению подвижности в течение определенного промежутка времени.

Применение традиционных суперпластификаторов, относящихся к ряду поверхностно активных веществ (ПАВ), неэффективно в связи с блокировкой высокоактивных алюминатов, которые являются источником расширения, о чем свидетельствует ряд исследований [10-13]. Поэтому, для достижения требуемого пластифицирующего эффекта с одновременным сохранением жизнеспособности бетонной смеси на НЦ в качестве пластификатора применен гиперпластификатор ГП-1 [14], относящийся к разряду поликарбоксилатных, механизм действия которого наиболее эффективен с точки зрения получения максимальных деформаций расширения в высокоподвижных бетонах на НЦ [13]. Физико-химические свойства гиперпластификатора ГП-1 [14] представлены в таблице 4.

Таблица 1. Химический состав компонентов напрягающего цемента

Компоненты	Содержание окислов, %					
	Al_2O_3	CaO	SO_3	C_3A	MgO	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Портландцемент марки М500 Д0	4,6	64,88	2,14	5	1,61	–
Глиноземистый цемент	34,92	35,5	0,79	–	–	–
Гипс	–	–	–	–	–	75,1
РСАМ	7,8	32,71	24,22	–	1,68	–

Таблица 2. Массовые соотношения компонентов напрягающих цементов

Марка цемента	Массовое содержание компонентов, %			
	Портландцемент М500 Д0 (ПЦ)	Глиноземистый цемент (ГЦ)	Гипс (Г)	РСАМ
НЦ1	63	15	12	10
НЦ2	72	11	9	8

Таблица 3. Составы бетонных смесей

Марка бетонной смеси	Расход сырьевых материалов на 1 м ³ бетонной смеси						
	Вязущее		Песок, кг	Щебень, кг	В/Вяз	Вода, л	ГП-1, л
Марка	Расход, кг						
НБ1	НЦ1	664	550	900	0,43	282	5,08
НБ2	НЦ1	480	650	1010	0,45	213,5	3,67
НБ3	НЦ2	664	550	900	0,43	282	5,08

Таблица 4. Физико-химические свойства гиперпластификатора ГП-1 [14]

Наименование показателя	Значение
Внешний вид	Прозрачный – до мутноватого, желтоватый раствор
Плотность, кг/м ³	1080-1100
Массовая доля сухого вещества, %	27-33
Водородный показатель, единицы рН	7-8
Коэффициент пластификации цементного теста при содержании добавки 0,3% от массы цемента по сухому веществу	30-37

Определение значений самонапряжения напрягающих бетонов выполнено в соответствии с требованиями [15] на бетонных призмах размером 100×100×400 мм в динамометрических кондукторах, реализующих условия одноосного упругого ограничения с жесткостью, эквивалентной продольному армированию в 1%, а прочности на сжатие – по ГОСТ 10180-90 [16] на кубах с ребром 100 мм. При этом хранение кондукторов и кубов осуществлялось, как в водных условиях, так и изолированных – без доступа дополнительной свободной воды в процессе гидратации.

Графическая интерпретация данных по определению самонапряжения и прочности на сжатие бетонов НБ1-НБ3 представлена на рис. 1 и 2, а основные результаты сведены в таблицы 5 и 6 соответственно.

Общий вид динамометрических кондукторов с бетонными призмами 100×100×400 мм, хранившихся в изолированных условиях и в воде, показан на рис. 3.

Общий вид разрушения бетонных призм из бетонов НБ1, НБ2 и НБ3 в динамометрических кондукторах, хранившихся в воде представлен на рис. 4.

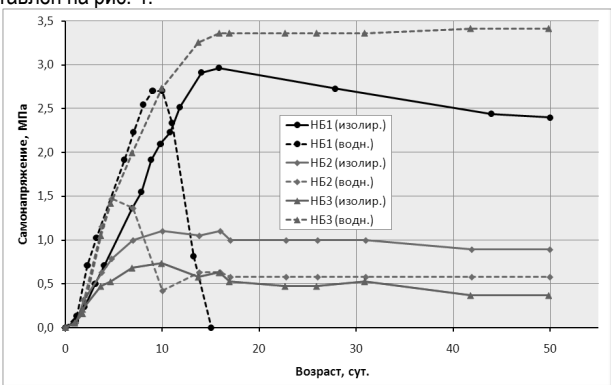


Рис. 1. Результаты экспериментального определения самонапряжения бетонов НБ1, НБ2 и НБ3 по методике [15]

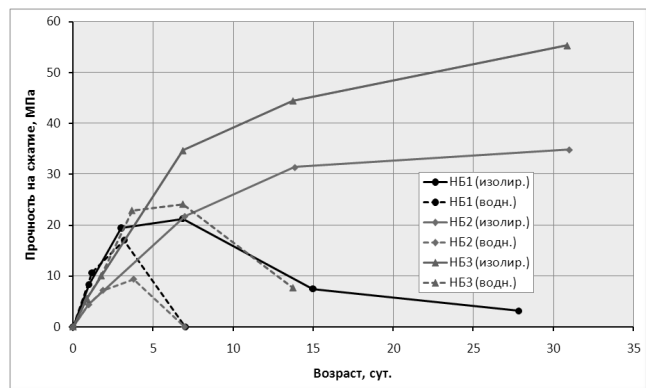


Рис. 2. Результаты определения прочности на сжатие бетонов НБ1, НБ2 и НБ3 в соответствии с [16]

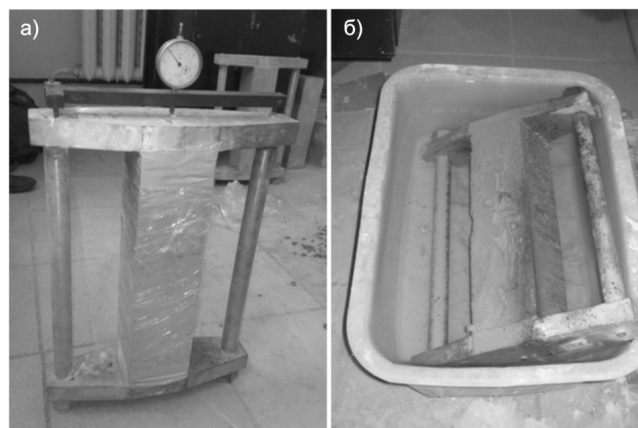


Рис. 3. Общий вид динамометрических кондукторов: а) кондуктор с призмой из бетона НБ1, хранившийся в изолированных условиях; б) кондуктор с призмой из бетона НБ3, хранившийся в воде

3. Экспериментальные исследования собственных деформаций сталетрубетонных элементов. На данном этапе экспериментальных исследований необходимо определить значения собственных деформаций сталетрубетонных элементов, вызванных расширением напрягающего бетона.

В экспериментальных исследованиях применяются тонкостенные электросварные прямошовные трубы, изготовленные на ОАО «Брестсельмаш» из углеродистой стали обыкновенного качества с пределом текучести 240 МПа, так как при использовании стандартных электросварных труб по ГОСТ 10704-91 [17] в качестве оболочек трубетонных элементов получаем большие значения коэффициентов продольного и поперечного армирования. Это в свою очередь ведет к снижению эффективности трубетона, которая падает при увеличении относительной толщины стенки, а также высокая жесткость оболочки может привести к доуплотнению структуры твердеющего бетона и снижению итоговых значений самонапряжения (вплоть до нуля).

Коэффициенты армирования сталетрубетонных элементов определяются по следующим формулам

$$\rho_{\theta} = \frac{2\pi \cdot r_c \cdot t_s}{2\pi \cdot r_c \cdot r_c} = \frac{t_s}{r_c}, \quad (1)$$

$$\rho_p = \frac{2t_s}{d_c} = \frac{t_s}{r_c}, \quad (2)$$

$$\rho_z = \frac{\pi(r_c + t_s)^2 - \pi r_c^2}{\pi r_c^2} = \frac{t_s}{r_c} \left(2 + \frac{t_s}{r_c} \right), \quad (3)$$

где ρ_{θ} , ρ_p , ρ_z – коэффициенты тангенциального, радиального (поперечного) и продольного армирования соответственно,

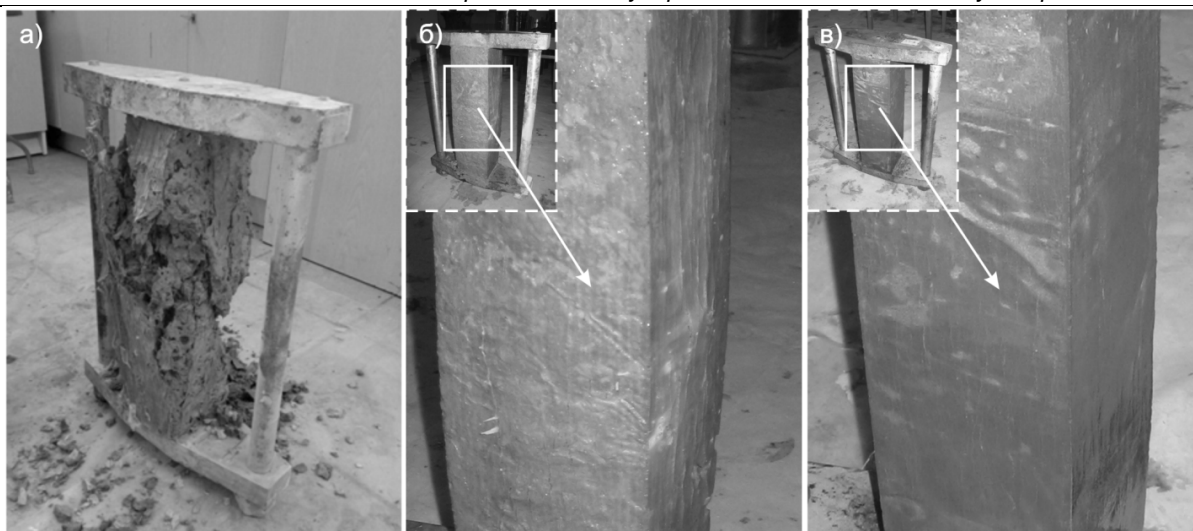


Рис. 4. Общий вид разрушения бетонных призм в динамометрических кондукторах, хранившихся в воде: а) характерное разрушение призм из бетона НБ1; б) характерное разрушение призм из бетона НБ2; в) характерное разрушение призм из бетона НБ3

Таблица 5. Основные результаты определения самоупреждения бетонов по методике [15] при хранении образцов в изолированных условиях

Марка бетона	Самоупреждение по методике [15] при хранении в изолированных условиях				Состояние призм в кондукторах
	Максимальное		В конце наблюдений		
	Возраст, сут.	Значение, МПа	Возраст, сут.	Значение, МПа	
НБ1	15,8	2,97 (7,2)	50 (27,8)	2,40 (3,1)	Видимых нарушений структуры бетона не выявлено
НБ2	10	1,10 (26)	50 (31)	0,89 (34,8)	Видимых нарушений структуры бетона не выявлено
НБ3	9,9	0,74 (39)	50 (31)	0,37 (55,3)	Видимых нарушений структуры бетона не выявлено

Примечание. В скобках указаны данные по определению прочности бетонов по ГОСТ 10180-90 [16]

Таблица 6. Основные результаты определения самоупреждения бетонов по методике [15] при хранении образцов в воде

Марка бетона	Самоупреждение по методике [15] при хранении в воде				Состояние призм в кондукторах
	Максимальное		В конце наблюдений		
	Возраст, сут.	Значение, МПа	Возраст, сут.	Значение, МПа	
НБ1	9	2,70	50	–	Явное разрушение структуры с отделением крупного заполнителя от цементно-песчаной матрицы
НБ2	4,8	1,47	50	0,58	Нарушение геометрии - "разбухание", образование продольных трещин на гранях с шириной раскрытия до 1 мм и глубиной до 10 мм
НБ3	15,9	3,36	50	3,41	Образование продольных трещин на гранях с шириной раскрытия до 0,5 мм и глубиной до 5 мм

Примечание. Образцы из бетонов НБ1, НБ2 и НБ3 помещались в воду в возрасте 1,2; 1,9 и 1,8 суток при прочности на сжатии по ГОСТ 10180-90 [16] 10,6; 7,2 и 10,1 МПа соответственно

r_c , d_c – радиус и диаметр бетонного ядра соответственно, t_s – толщина стенки стальной оболочки.

Используемые в экспериментальных исследованиях трубы имеют внутренний диаметр 200 мм, толщину стенки 1; 1,5; 2 мм и длину 600 мм (см. рис. 5а). Таким образом, при заполнении внутренней полости бетоном коэффициент продольного армирования (выраженный в %) принимает значения 2; 3; 4 %, а поперечного – 1; 1,5; 2 % соответственно.

В данной работе исследованы собственные деформации трубобетонных элементов на основе бетона НБ1, показавшего максимальную энергоактивность в изолированных условиях при одноосном упругом ограничении (см. рис. 1 и табл. 5). Экспериментальная серия включает 9 образцов (по три "образца-близнеца" для каждой

толщины стенки, см. табл. 7). Использование гиперпластификатора ГП-1 позволило отказаться от дополнительного уплотнения бетонной смеси при бетонировании сталетрубобетонных элементов, при этом расплыв конуса по СТБ 1544-2005 [18] составил 86 см, что соответствует марке бетонной смеси по удобоукладываемости РК-6.

Для измерения продольных и тангенциальных деформаций оболочек сталетрубобетонных элементов на стадии расширения нагружаемого бетона использовались тензорезисторы с базой 20 мм, наклеенные в соответствующих направлениях. По высоте элементов тензорезисторы наклеивались в трех уровнях – по центру и на расстоянии 100 мм от торцов, а в поперечном направлении – через 120°. Таким образом, деформации образца измерялись с помощью 18 тензорезисторов (по 9 тензорезисторов для каждого из направлений) (см. рис. 5б).

По экспериментально измеренным продольным и тангенциальным деформациям оболочки сталебетонного элемента с помощью обобщенного закона Гука вычислялись напряжения в оболочке по соответствующим направлениям:

$$\sigma_{s,\theta} = \frac{E_s}{1-\nu_s^2}(\varepsilon_{s,\theta} + \nu_s \varepsilon_{s,z}), \quad (4)$$

$$\sigma_{s,z} = \frac{E_s}{1-\nu_s^2}(\varepsilon_{s,z} + \nu_s \varepsilon_{s,\theta}), \quad (5)$$

где $\sigma_{s,\theta}$, $\sigma_{s,z}$ – тангенциальные и продольные напряжения в оболочке соответственно; $\varepsilon_{s,\theta}$, $\varepsilon_{s,z}$ – тангенциальные и продольные относительные деформации оболочки соответственно; E_s , ν_s – модуль упругости и коэффициент Пуассона стали соответственно.

Затем, учитывая коэффициенты армирования, а также предполагая равенство тангенциальных и радиальных напряжений в бетоне, определялись напряжения в ядре элемента по формулам

$$\sigma_{CE,\rho} = \sigma_{s,\theta} \cdot \rho_\rho, \quad (6)$$

$$\sigma_{CE,z} = \sigma_{s,z} \cdot \rho_z, \quad (7)$$

где $\sigma_{CE,\rho}$, $\sigma_{CE,z}$ – радиальные и продольные напряжения в бетонном ядре.

Общий вид стальных оболочек до бетонирования и сталебетонных элементов после – показан на рис. 6.

Графическая интерпретация экспериментальных данных по определению тангенциальных и осевых (продольных) относительных деформаций и вычисленных по ним соответствующих напряжений в сталебетонных элементах на нагружающем бетоне приведена на рис. 7-9.

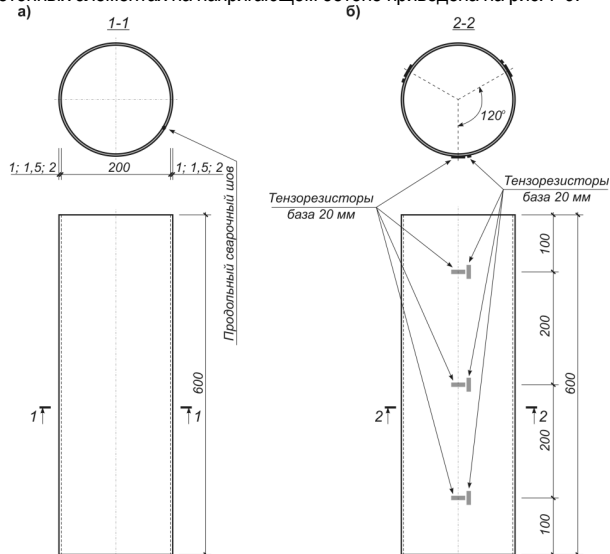


Рис. 5. Стальные оболочки для изготовления самоупроченных сталебетонных элементов: а) геометрические параметры оболочек; б) схема расположения тензорезисторов на поверхности оболочек



Рис. 6. Общий вид элементов серий I-III: а) до бетонирования; б) после бетонирования

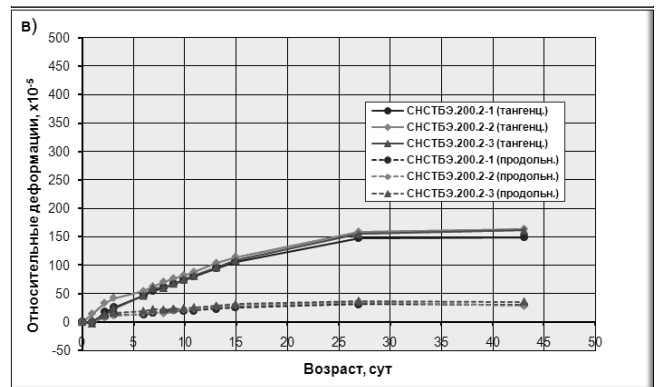
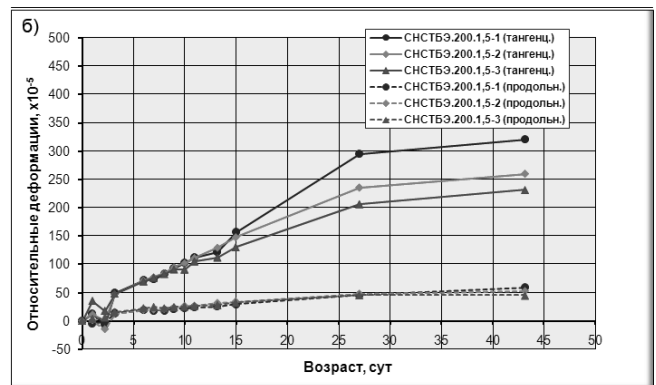
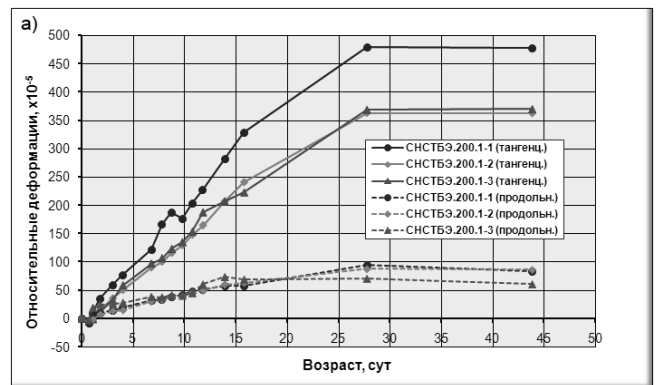


Рис. 7. Тангенциальные и осевые (продольные) относительные деформации оболочек сталебетонных элементов: а) при толщине стенки оболочки 1 мм; б) при толщине стенки оболочки 1,5 мм; в) при толщине стенки оболочки 2 мм

Таблица 7. Основные характеристики экспериментальных образцов

Номер серии	Марка образца	Размеры, мм	Марка напрягающего бетона
I	СНСТБЭ.200.1-1	$\varnothing 200; t = 1; l = 600$	НБ1
	СНСТБЭ.200.1-2	$\varnothing 200; t = 1; l = 600$	
	СНСТБЭ.200.1-3	$\varnothing 200; t = 1; l = 600$	
II	СНСТБЭ.200.1,5-1	$\varnothing 200; t = 1,5; l = 600$	НБ1
	СНСТБЭ.200.1,5-2	$\varnothing 200; t = 1,5; l = 600$	
	СНСТБЭ.200.1,5-3	$\varnothing 200; t = 1,5; l = 600$	
III	СНСТБЭ.200.2-1	$\varnothing 200; t = 2; l = 600$	НБ1
	СНСТБЭ.200.2-2	$\varnothing 200; t = 2; l = 600$	
	СНСТБЭ.200.2-3	$\varnothing 200; t = 2; l = 600$	

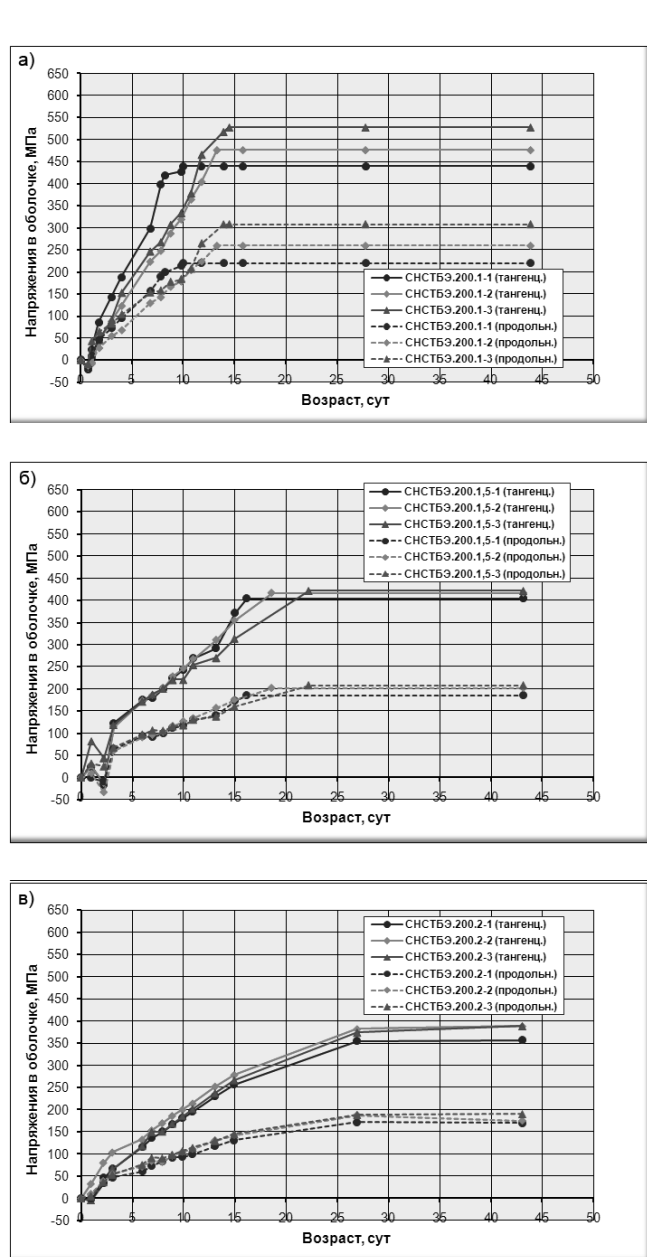


Рис. 8. Тангенциальные и осевые (продольные) напряжения в оболочках сталежелезобетонных элементов: а) при толщине стенки оболочки 1 мм; б) при толщине стенки оболочки 1,5 мм; в) при толщине стенки оболочки 2 мм

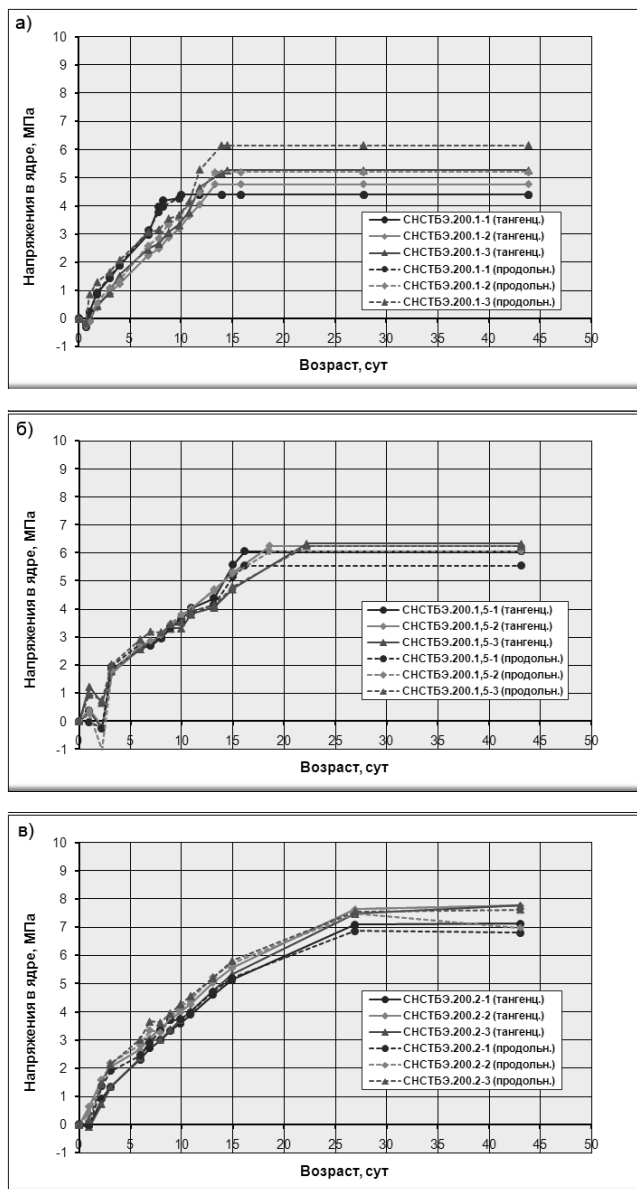


Рис. 9. Тангенциальные и осевые (продольные) напряжения в ядрах сталежелезобетонных элементов: а) при толщине стенки оболочки 1 мм; б) при толщине стенки оболочки 1,5 мм; в) при толщине стенки оболочки 2 мм

Таким образом, в результате экспериментальных исследований средние радиальные $\sigma_{CE,r}$ и осевые $\sigma_{CE,z}$ (продольные) напряжения сжатия в бетоне самоупрочненных сталежелезобетонных элементов достигли следующих значений:

- в элементах серии I с толщиной стенки оболочки $t_s = 1$ мм ($\rho_p = 1\%$, $\rho_z = 2\%$) $\sigma_{CE,p} = 4,83$ МПа, $\sigma_{CE,z} = 5,27$ МПа;
- в элементах серии II с толщиной стенки оболочки $t_s = 1,5$ мм ($\rho_p = 1,5\%$, $\rho_z = 3\%$) $\sigma_{CE,p} = 6,23$ МПа, $\sigma_{CE,z} = 5,97$ МПа;
- в элементах серии III с толщиной стенки оболочки $t_s = 2$ мм ($\rho_p = 2\%$, $\rho_z = 4\%$) $\sigma_{CE,p} = 7,57$ МПа, $\sigma_{CE,z} = 7,13$ МПа.

Величина самонапряжения бетона НБ1, использованного для изготовления опытных образцов, по самонапряжению, определенная в условиях одноосного стандартного ограничения (1%), но при хранении в изолированных условиях (моделирующих условия твердения бетона в трубе), составила $\sigma_{CE} = 2,4$ МПа (см. рис. 1 и таб. 5).

По величине самонапряжения бетона был выполнен расчет самонапряжения бетонного ядра элементов серий I-III по мультипликативной зависимости [19]. Для элементов с толщиной стенки оболочки 1; 1,5; 2 мм самонапряжение ядра в радиальном и продольном направлениях соответственно составило 3,6 и 3,98 МПа; 3,84 и 4,14 МПа; 3,98 и 4,22 МПа.

Заключение. Выполненные экспериментальные исследования свидетельствуют об эффективности применения комплексной расширяющейся добавки для получения самонапряженных сталетрубо-бетонных элементов. При этом возможно получать необходимую величину самонапряжения бетона ядра, варьируя количественный состав напрягающего цемента и его расход.

Применение комплексной расширяющейся добавки позволило решить основную проблему использования классических напрягающих цементов и бетонов на их основе в труботетоне – рост собственных деформаций в условиях изоляции без доступа дополнительной свободной воды в процессе гидратации, необходимой для перекристаллизации моносульфата в этtringит.

Значения самонапряжения, рассчитанные по мультипликативной зависимости [19], значительно занижены в сравнении с экспериментально полученными значениями самонапряжения бетонного ядра сталетрубобетонных элементов. Это может объясняться тем, что условия хранения образцов из напрягающего бетона при определении базовой характеристики – величины самонапряжения (см. табл. 5), необходимой для расчета самонапряжения бетона в конструкции, отличались от стандартных условий [19] – хранение образцов после набора бетоном прочности 8-15 МПа в воде или обильно влажном состоянии. Однако при водном хранении образцов, вследствие высокой энергоактивности составов, происходило разрушение структур напрягающего бетона (см. табл. 6).

Таким образом, в связи с изолированными условиями твердения напрягающего бетона в условиях объемного ограничения стальной оболочкой труботетонного элемента, а также вследствие необходимости достижения высокой энергии расширения таких составов, необходима корректировка методик определения базовых характеристик напрягающего бетона [15, 19], а также напрягающего цемента [20]. Это в свою очередь требует пересмотра зависимостей [19, 6] по прогнозированию самонапряжения бетона в конструкции в условиях объемного ограничения.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Красильников, К. Г. Физико-химия собственных деформаций цементного камня / К.Г. Красильников, Л.В. Никитина, Н.Н. Скоблинская. – М.: Стройиздат, 1980.
2. Кузнецова, Т. В. Алюминатные и сульфоалюминатные цементы / Т.В. Кузнецова. – М.: Стройиздат, 1986.
3. Кузнецова, Т. В. Структура и свойства расширяющихся и напрягающих цементов / Т.В. Кузнецова // Ресурсосберегающие технологии железобетонных конструкций на основе напрягающих цементов: Сборник докладов Всесоюзной конференции в г. Грозном. – М.: Стройиздат, 1989. – С.8-9.
4. Михайлов, В.В. Расширяющийся и напрягающий цементы и самонапряженные железобетонные конструкции / В.В. Михайлов, С.Л. Литвер. – М.: Стройиздат, 1974. – 312 с.
5. Михайлов, В.В. Предварительно напряженные железобетонные конструкции / В.В. Михайлов. – М.: Стройиздат, 1978.
6. Тур, В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона / В.В. Тур. – Изд-во БПИ, 1997. – 276 с.
7. Протько, Н.С. Свойства и особенности применения расширяющей добавки РСАМ в технологии бетона и растворов / Н.С. Протько // Строительная наука и техника. – 2007. – № 5. – С. 123-130.
8. Рекомендации по проектированию составов бетонов с компенсированной усадкой или самонапряжением. – Брест: БГТУ, 2005. – 13 с.
9. Design Guide for SHS Concrete-Filled Columns. – Corus Tubes, 2002.
10. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков // 2-е изд., перераб. и доп. – М., 1998. – 768 с.
11. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1989. – 215 с.
12. Тур, В. В. Самонапряженный железобетон: исследование, опыт и перспективы применения / В.В. Тур // Строительная наука и техника. – 2005. – № 1. – С. 62-69.
13. G. Xu, Beaudion J.J. Effect of Polycarboxylate Superplasticizer on Contribution of Internal Transition Zone of Electrical Conductivity of Portland Cement Mortar. – ACI Material Journal, v. 97, N 4, 2000 – p.p. 418–424.
14. Калиновская, Н.Н. Технологические свойства, прочность и эффективное применение бетона, модифицированного гиперпластификатором ГП-1 / Н.Н. Калиновская // Строительная наука и техника. – 2007. – № 5. – С. 74-83.
15. СТБ (проект). Бетон на напрягающем цементе. Технические условия.
16. ГОСТ 10180-90. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 41 с.
17. ГОСТ 10704-91. Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 7 с.
18. СТБ 1544-2005. Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия. – Минск: Минстройархитектуры РБ, 2005. – 17 с.
19. Пособие по проектированию самонапряженных железобетонных конструкций (к СНиП 2.03.01-84 «Бетонные и железобетонные конструкции») / НИИЖБ Госстроя СССР и ЦНИИпромзданий Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 64 с.
20. СТБ 1335-2002. Цемент напрягающий. Технические условия. – Минск: Минстройархитектуры РБ, 2002. – 11 с.

Материал поступил в редакцию 10.03.09

BONDARENKO V.M., PAVLOVA I.P. Application of concrete on straining cement at manufacturing steel a pipe of concrete elements

The analysis of features of application of straining cement and concrete on his basis is executed at manufacturing steel a pipe of concrete elements. It is offered to use the complex extending additive at manufacturing straining cement. The experimental researches of own deformations of straining concrete are carried out on the basis of cements with the complex extending additive in conditions одноосного and volumetric elastic restriction.